

수평력을 받는 무리말뚝의 하중분담특성

The Load Distribution Characteristics of Pile Group under Lateral Loading

안 병 철[†] · 오 세 옥¹⁾

Ahn, Byungchul · Oh, Sewook

ABSTRACT : This paper analyzed the characteristics of p -multiplier and the load distribution of H-pile group installed in weathered soil under horizontal loading. The results of this study conducted in pile arrangement (2×3, 3×3), the pile center to center spacing (2D, 4D, 6D), and soil density (relative density: 40%, 80%) were drawn as follows. As to the average horizontal loading applied to each pile in pile groups, the fewer number of piles was, the larger average horizontal resistance became. As the result of analysis on p - y curves of single piles and pile groups according to the pile distance and the soil density, as the pile spacing was increased from 2D to 6D, the interaction coefficients of pile group showed 0.85~0.94 (piles in the front row), 0.57~0.79 (piles in the middle row), and 0.60~0.71 (piles in the rear row) in the loose ground and showed 0.76~0.82 (piles in the front row), 0.58~0.73 (piles in the middle row), and 0.53~0.70 (piles in the rear row) in the dense ground. As above, the wider pile distance was, the larger interaction coefficient value was shown among piles. In addition, piles in the front row showed bigger interaction coefficients than that of piles in the middle and back row.

Keywords : Pile Group, p -multiplier, Pile spacing, Lateral Loading

요 지 : 본 연구에서는 풍화토 지반에 설치된 수평하중을 받는 H-pile 무리말뚝의 하중분담특성 및 상호작용계수(p -multiplier)를 분석하였다. 말뚝의 배열(2×3, 3×3), 말뚝의 간격(2D, 4D, 6D), 그리고 지반밀도(상대밀도: 40%, 80%)를 고려한 수평재하 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 무리말뚝내 각각의 말뚝에 작용된 평균수평하중은 말뚝의 수가 감소할수록 평균 수평저항력이 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝간격과 지반밀도에 따라 단말뚝과 무리말뚝의 p - y 곡선을 분석한 결과 말뚝간격이 2D에서 6D로 증가함에 따라 무리말뚝의 상호작용계수값이 느슨한 지반의 경우 0.85~0.94(앞열말뚝), 0.57~0.79(중간말뚝), 0.60~0.71(후열말뚝), 조밀한 지반의 경우 0.76~0.82(앞열말뚝), 0.58~0.73(중간말뚝), 0.53~0.70(후열말뚝)의 값을 각각 나타냈다. 이와 같이 단말뚝과 무리말뚝간 상호작용계수는 말뚝간격이 증가할수록 그 값이 증가함을 알 수 있었으며, 또한 앞열의 무리말뚝이 중간 및 후열말뚝들보다 보다 큰 상호작용계수 값을 나타냈다.

주요어 : 무리말뚝, 상호작용계수, 말뚝간격, 수평하중

1. 서 론

말뚝기초는 수직하중뿐만 아니라 수평 또는 인발하중을 받게 되는데, 일반적으로 교량, 건물, 해양구조물, 항만시설물, 옹벽 등 대개의 구조물의 기초말뚝은 수평력을 받게 된다.

말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하기 위해서는 무엇보다도 이런 복잡한 하중조건하에서의 말뚝의 움직임 및 말뚝과 지반사이의 상호작용에 관한 메카니즘을 명백하게 분석할 필요성이 대두되고 있다.

다양하고 복잡한 무리말뚝의 상호작용으로 인해 무리말뚝의 전체 지지력은 단순히 각 개별 말뚝의 지지력의 합으

로 산정할 수 없으며 정확한 무리말뚝 지지력의 산정을 위해서는 무리말뚝을 구성하는 요소들 사이의 상호작용인 변위장 중첩 또는 응력장 중첩 등과 같은 무리말뚝의 거동에 대한 합리적인 고려가 필요하다.

수평력을 받는 말뚝의 설계방법으로 p - y 곡선방법이 많이 사용되고 있으며, 이 방법은 Matlock과 Reese(1960)에 의해 많은 발전이 되어 왔다. Rollins와 Sparks(2002)는 두부고정 무리말뚝의 거동 분석을 위해 캡과 일체로 연결된 무리말뚝에 대한 현장실험을 통해 상호작용계수를 제안하였다.

국내에서는 무리말뚝의 상호작용에 관한 근래에 많은 연구(유동훈(1998), 안광국(2005))가 수행되었다.

말뚝이 시공되어 질 때 지반밀도와 말뚝간격비에 따른

† 정희원, 충청대학 소방안전과 겸임교수(E-mail : anbc90@naver.com)

1) 정희원, 경북대학교 이공대학 토목공학과 조교수

지중응력이 달라지고 말뚝과 주변지반과의 상호작용 효과가 달라지기 때문에 좀더 효율적이고 합리적인 무리말뚝설계를 위해서는 이들의 영향에 대한 공학적인 규명이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 지금까지 국내외에서 진행되어온 무리말뚝에 관한 연구를 바탕으로 H형강 무리말뚝의 두부에 수평하중을 작용시킨 경우 지반밀도 및 말뚝배열에 따른 무리말뚝의 하중분담 특성을 규명하고자 하였다.

2. 수평하중을 받는 무리말뚝의 거동

2.1 개요

무리말뚝에 수평하중이 작용할 때 각 말뚝이 지반내의 응력을 통하여 상호 간섭되기 때문에 단말뚝에 비하여 복잡한 거동을 나타낸다. 즉, 말뚝간격이 좁고 말뚝개수가 많을수록 무리말뚝전체의 수평저항력이 저하되는 현상이 나타나거나 무리말뚝중의 각 말뚝의 분담하중이 서로 다른 현상이 강하게 나타난다. 이러한 현상을 그룹효과 G_e 의 개념에 기초를 두고 합리적인 방법으로 단말뚝의 수평저항력에 대한 무리말뚝의 수평저항력을 표현할 수 있다. 그림 1은 수평하중을 받고 있는 무리말뚝의 단면이며, 점선은 각각의 말뚝이 그림자효과(shadow effect)에 의해 상호작용하고 있는 것을 도해적으로 나타낸 것이다.

2.2 그룹효과

수평하중을 받는 무리말뚝의 지지력은 단말뚝의 극한수평지지력을 무리내의 말뚝수 만큼 곱한 값과 무리말뚝사이의 지반과 말뚝들을 포함하는 영역에서의 극한수평지지력의 값 중 작은 값을 사용하여 구할 수 있으며 더 합리적인 방법은 그룹효과 G_e 의 개념을 적용하는 것으로 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

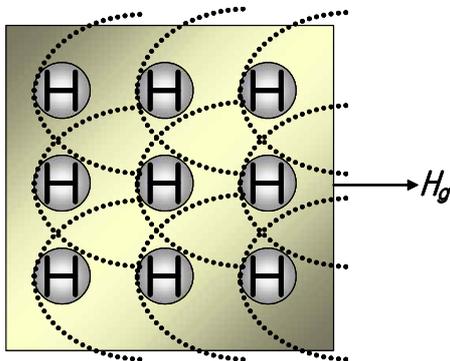


그림 1. 그림자효과에 의한 무리말뚝의 지지력 감소개념

그룹효과(G_e)는 지반상수, 무리말뚝의 크기 및 모양, 말뚝길이 그리고 말뚝간격에 의존한다.

$$G_e = \frac{(Q_u)_g}{nQ_u} \quad (1)$$

여기서,

n : 말뚝개수

Q_u : 단말뚝의 극한수평지지력(kN)

$(Q_u)_g$: 무리말뚝의 극한수평지지력(kN)

2.3 무리말뚝의 상호작용계수(p -multiplier)

수평하중을 받는 말뚝의 하중전이 함수인 $p-y$ 곡선을 이용한 방법은 수평하중을 받는 말뚝의 설계에 폭넓게 이용되어진다.

이 방법은 탄성지반상의 beam-column 이론과 말뚝에서 지반으로 하중을 전달하는 비선형 스프링모델을 이용하는 방법으로 간편성과 지반의 소성변형을 고려하는 점에서 널리 이용되고 있다. 이 스프링은 수평하중을 받는 말뚝체에서 임의의 깊이에서 지반의 반력을 나타낸다.

그림 2는 p -multiplier 기법의 개념을 나타낸 것으로 단말뚝의 $p-y$ 곡선과 무리말뚝에서 위치에 따른 $p-y$ 곡선들을 비교하여 p -multiplier를 산정함으로써 무리말뚝효과를 고려할 수 있다. 또한 p -multiplier는 무리말뚝에서 말뚝이 위치한 열에 영향을 받으며 말뚝의 두부조건에는 영향을 받지 않는다.

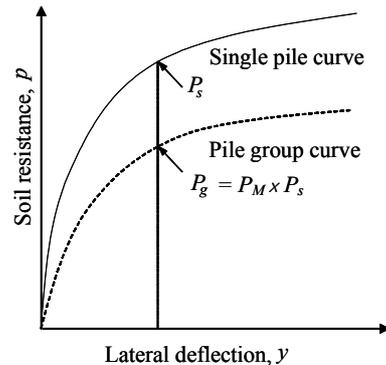


그림 2. 무리말뚝의 p -multiplier

식 (2)는 무리말뚝의 p -multiplier를 산정하는 방법이다.

$$P_M = \frac{P_g}{P_s} \quad (2)$$

여기서,

P_M : 무리말뚝의 상호작용계수

P_g, P_s : 동일한 변위조건하에서의 무리말뚝과 단말뚝의 하중(kN)

3. 실내 시험결과 분석

3.1 실내시험방법

표 1은 모형지반 조성을 위해 사용된 화강 풍화토의 기본 물성값이며, 표 2는 모형말뚝의 제원을 나타낸 것이다.

중량 24.5kN의 철제 해머를 15cm 높이에서 자유낙하시켜 중앙부를 기준으로 시계 방향으로 말뚝을 타입하였다.

수평재하시험은 설계하중의 150%까지의 하중을 20단계로 나누어 재하 하였다.

말뚝설치간격(S)과 지반밀도를 달리하여 표 3의 방법으로 실험을 각각 실시하였다.

그림 3과 4는 수평력을 받는 무리말뚝의 단면도 및 실험 장치 모식도를 나타낸 것이다. 말뚝선단과 모형 상자의 바닥과는 적어도 말뚝지름의 3~4배 이상의 간격을 두어 모형 상자 바닥의 영향을 배제시켰다.

말뚝에 가한 전체하중은 추의 무게를 이용하였으며, 개개의 말뚝이 받는 하중은 변형률계이지(strain gauge)의 측정치를 분석하여 얻을 수 있었다.

수평재하 시험의 경우 모형토조의 크기효과를 고려하여 Prakash(1967)가 제안한 기준을 만족시키기 위해 65cm×55cm×55cm의 크기로 제작하였다. Prakash는 수평재하실험시 발생하는 응력영역이 하중방향으로는 말뚝지름의 8~12배 정도까지 영향을 준다고 제안하였다.

표 1. 실험에 사용된 흙의 기본물성

| 항 목 | | 실험값 | |
|--------|------------------------------|--------------|-----|
| 비 중 | | 2.790 | |
| 밀도시험 | 최대건조단위중량(kN/m ³) | 17.70 | |
| | 최소건조단위중량(kN/m ³) | 14.24 | |
| 직접전단시험 | 내부마찰각(ϕ) | $D_r = 40\%$ | 31° |
| | | $D_r = 80\%$ | 42° |

표 2. 모형 H-pile의 제원 및 특성

| 재료 | 길이 (cm) | 플랜지 (cm) | 웹 (cm) | 등가직경 (cm) | 두께 (cm) | 탄성계수 (kN/m ²) |
|----|---------|----------|--------|-----------|---------|---------------------------|
| 강철 | 45.0 | 2.0 | 2.0 | 2.25 | 0.1 | 2.14×10^8 |

표 3. 실험방법

| 형태 | 배열 | 간격(S) | 상대밀도 |
|------|-----|-------|------------|
| 단말뚝 | - | - | 40% 80% |
| 무리말뚝 | 2×3 | 2D | |
| | 3×3 | 6D | |

3.2 수평하중에 따른 p-y곡선

그림 5와 그림 6은 수평하중을 받는 무리말뚝의 p-y곡선을 나타낸 것이다.

그림 5와 같이 느슨한 지반의 경우 말뚝의 간격비가 비교적 적을수록 단말뚝과 무리말뚝 내 하나의 말뚝이 받는 지반반력차이가 0.8kN/m(앞열말뚝기준)로 크게 나타났으나 간격비가 증가함에 따라 단말뚝과 무리말뚝 내 개개의 말뚝이 받는 하중차이가 0.4kN/m로 감소하는 것으로 나타났다.

그림 6과 같이 조밀한 지반의 경우에도 느슨한 지반과 유사한 경향을 보였으며, 간격비가 2D인 경우 단말뚝과 무리말뚝간 지반반력 차이는 1.8kN/m(앞열말뚝기준), 6D인 경우 1.2kN/m로 각각 나타났다.

말뚝이 수평하중을 받는 경우 단말뚝보다 무리말뚝내 개개의 말뚝이 받는 지반반력이 적은 이유는 간격비가 감소할수록 말뚝간 응력이 중첩되어 지반의 저항력이 상대적으로 감소함으로써 무리말뚝의 지반반력이 적게 나타나는 것으로 판단된다.

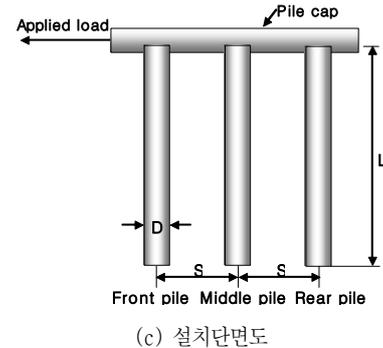
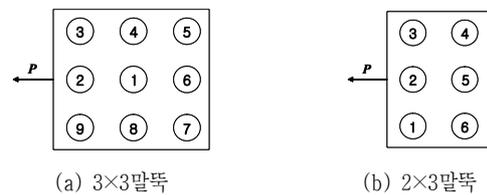


그림 3. 수평력을 받는 무리말뚝의 단면도

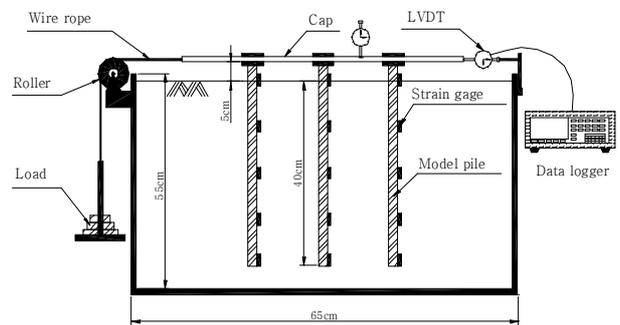


그림 4. 수평하중시험 모식도

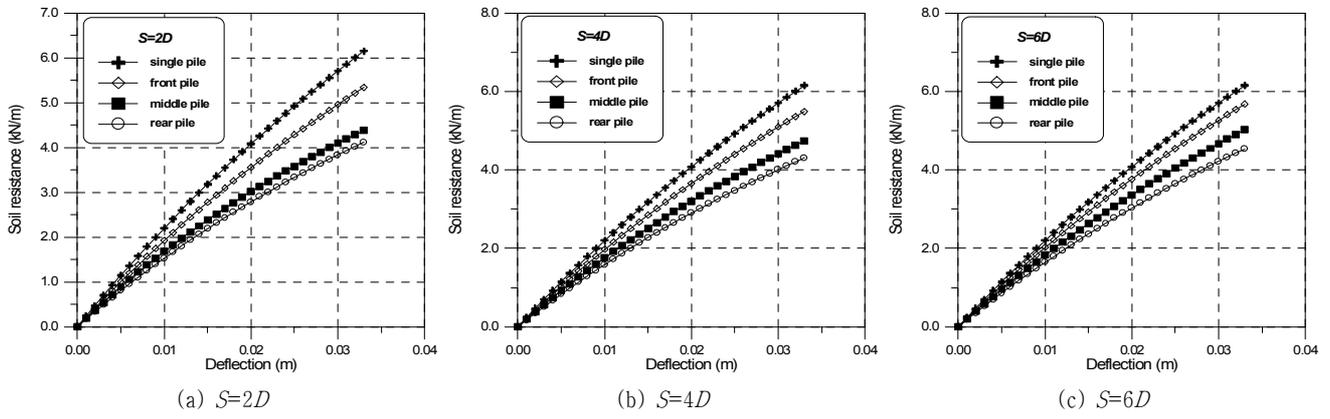


그림 5. $p-y$ 곡선($D_r = 40\%$)

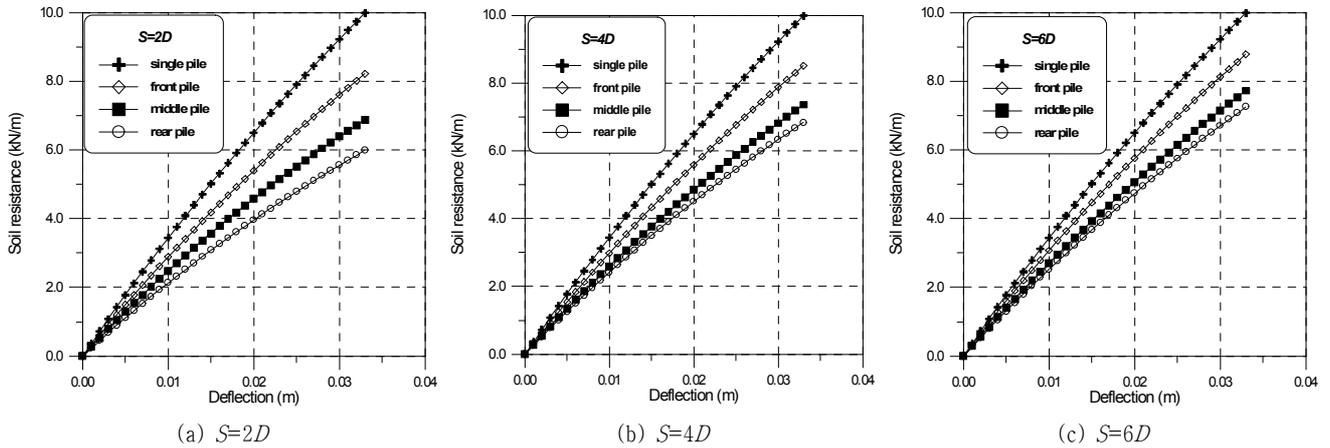


그림 6. $p-y$ 곡선($D_r = 80\%$)

3.3 무리말뚝의 하중분담특성

3.3.1 느슨한 지반

그림 7은 3×3 무리말뚝의 간격비에 따른 수평하중분포 (P/P_{av} , 여기서, P : 개별하중, P_{av} : 평균하중)를 나타낸 것이다. 간격비가 증가함에 따라 앞열말뚝의 하중분담률은 감소

하고 후열의 하중분담률은 증가함을 알 수 있다. 간격비가 작을 수록 앞열말뚝(front pile)이 대부분 하중을 담당하며, 중간열과 후열의 말뚝들은 앞열의 무리말뚝에 비해 매우 작은 하중분담률을 나타냈다. 간격이 대략 8D인 경우 하중분담이 전체말뚝에 골고루 분포되는 경향을 나타냈다.

그림 8은 2×3 무리말뚝으로 앞열의 말뚝중에 하중작용지

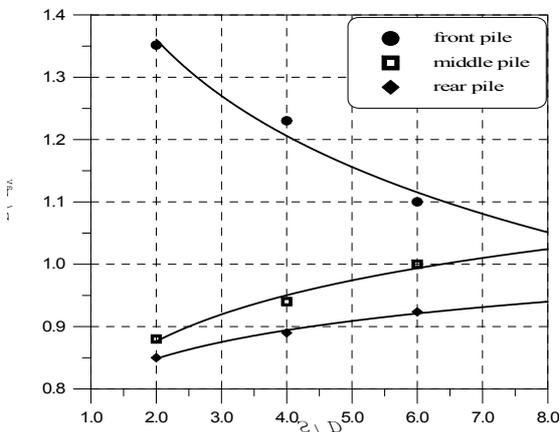


그림 7. 3×3 무리말뚝의 수평하중분담비($D_r = 40\%$)

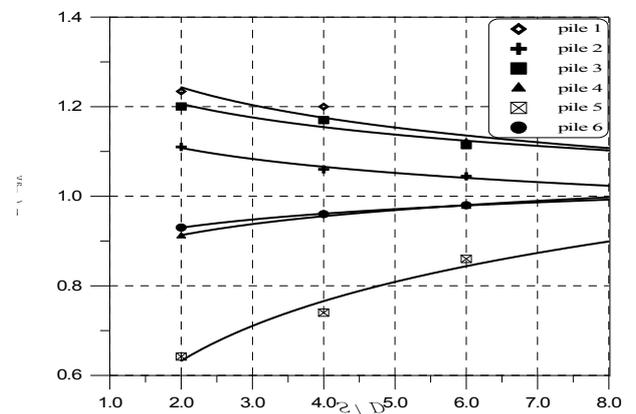


그림 8. 2×3 무리말뚝의 수평하중분담비($D_r = 40\%$)

점부터 거리가 가장 짧은 2번 말뚝보다 3번과 9번의 말뚝이 더 큰 하중분담을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 후열의 말뚝들에서도 하중분담에 가장 가까운 5번 말뚝이 후열 말뚝들 중에 가장 작은 하중분담률을 나타냈다. 3×3무리말뚝과 마찬가지로 간격이 8D 이상에서는 각 열의 하중분담률 차이가 줄어드는 경향을 나타냈다.

3.3.2 조밀한 지반

그림 9는 상대밀도 80%지반에서 3×3무리말뚝내의 개개 말뚝에 작용하는 수평하중분담률을 나타낸 것이다. 느슨한 지반의 경우와 마찬가지로 간격비가 증가함에 따라 앞열 무리말뚝의 하중분담률은 감소하고 후열의 하중분담률은 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 간격이 8D인 경우에도 앞열의 무리말뚝이 더 큰 하중분담률을 나타내고 있어 전체 말뚝이 균등한 하중분담률을 나타내기 위해서는 느슨한 지반보다 더 큰 간격비가 필요함을 알 수 있다. 조밀한 지반일수록 수평하중에 대한 썬기과괴영역의 중첩효과가 중간열과 뒷열 무리말뚝에 증가하기 때문에 조밀한 지반에서 하중분담률이 앞열 무리말뚝에 편중되는 것으로 분석된다.

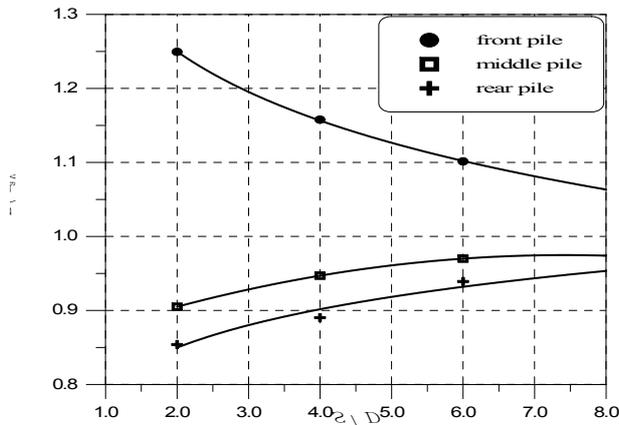


그림 9. 3×3 무리말뚝의 수평하중분담비(D_r = 80%)

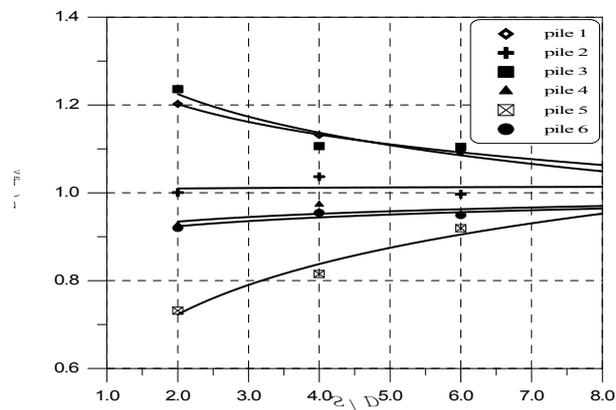


그림 10. 2×3 무리말뚝의 수평하중분담비(D_r = 80%)

그림 10은 2×3무리말뚝의 간격비에 따른 수평하중분포 양상을 나타낸 것이다. 2번, 4번, 6번 말뚝들은 대략 평균수평분담률 근처에서 말뚝간격비에 상관없이 일정한 하중분담비율을 나타내었으며, 앞열의 1번과 3번 말뚝 그리고 뒷열의 5번 말뚝은 느슨한 지반의 경우와 비슷한 양상을 나타냈다.

3.4 무리말뚝의 상호작용계수

그림 11과 그림 12는 단말뚝의 p-y곡선과 무리말뚝에서 위치에 따른 p-y곡선들을 비교하여 간격비에 따른 위치별 상호작용계수(p-multiplier)를 산정하여 나타낸 것이다.

그림 11은 느슨한 지반에서의 p-multiplier를 나타낸 것으로 말뚝간격이 2D인 경우 앞열, 중간열, 후열의 무리말뚝은 0.85, 0.57, 0.60, 4D인 경우 0.89, 0.69, 0.64, 6D인 경우에는 0.94, 0.79, 0.71로 각각 산정되었다. 다른 위치의 무리말뚝보다 앞열의 무리말뚝이 비교적 단말뚝의 p-y거동과 비슷한 양상을 나타냈으며, 또한 간격비가 증가할수록 1에 가까운 값을 나타냈다.

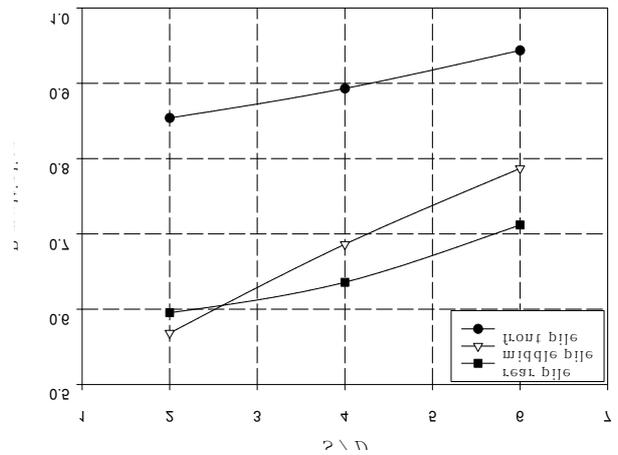


그림 11. 3×3 무리말뚝의 p-multiplier(D_r = 40%)

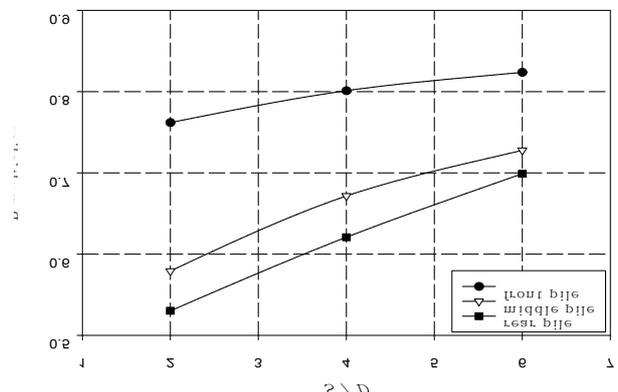


그림 12. 3×3 무리말뚝의 p-multiplier(D_r = 80%)

그림 12는 조밀한 지반에서의 p -multiplier값을 나타낸 것으로 말뚝간격이 $2D$ 인 경우 0.76, 0.58, 0.53, $4D$ 인 경우 0.80, 0.67, 0.62, $6D$ 인 경우에는 0.82, 0.73, 0.70으로 각각 산정되었다. 느슨한 지반과 비교하였을 때 p -multiplier값이 감소하는 경향을 나타냈으며, 앞열의 무리말뚝과 다른 위치의 무리말뚝과의 p -multiplier값의 차이는 느슨한 지반에 비해 줄어드는 것으로 나타났다.

표 4. p -multiplier에 대한 기존연구와 실험결과 비교(3×3 무리말뚝)

| Reference | Soil condition | Pile spacing (S) | p -multiplier | | |
|--------------|----------------|------------------|-----------------|-------------|-----------|
| | | | front pile | middle pile | rear pile |
| Brown (1987) | sand (dense) | $3D$ | 0.80 | 0.40 | 0.30 |
| McVay (1998) | sand (dense) | $3D$ | 0.80 | 0.40 | 0.30 |
| | sand (loose) | $3D$ | 0.65 | 0.45 | 0.35 |
| | sand (medium) | $3D$ | 1.00 | 0.85 | 0.70 |
| This study | sand (loose) | $2D$ | 0.85 | 0.57 | 0.60 |
| | | $4D$ | 0.89 | 0.69 | 0.64 |
| | | $6D$ | 0.94 | 0.79 | 0.71 |
| | sand (dense) | $2D$ | 0.76 | 0.58 | 0.53 |
| | | $4D$ | 0.80 | 0.67 | 0.62 |
| | | $6D$ | 0.82 | 0.73 | 0.70 |

표 4는 p -multiplier에 대한 기존 문헌의 연구결과와의 비교를 나타낸 것이다. 앞열을 기준으로 간격비가 증가하고 지반밀도가 증가할수록 무리말뚝의 위치별 p -multiplier값의 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

이는 중간열과 뒷열의 말뚝들은 앞열말뚝의 변위로 인해 지반반력이 상대적으로 감소하기 때문이다. 반면 간격비가 증가할수록 앞열 무리말뚝의 영향을 덜 받게 되므로 말뚝의 위치별 지반반력 분포차이가 감소하는 결과를 나타냈다.

관련문헌결과와 비교해 본 결과 중간열과 후열의 말뚝에서 Brown(1987)과 McVay(1998)이 제시한 p -multiplier값 보다는 크게 나타났다.

4. 결 론

수평하중을 받는 무리말뚝의 하중분담특성을 규명하기 위해 말뚝간격, 배열형태, 지반조건에 따라 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 무리말뚝의 간격비가 작을수록 개개의 말뚝이 받는 지

반반력이 단말뚝보다 작게 나타났으며, 말뚝간 거리가 증가 할 수록 지반반력 차이가 적게 나타났다. 이는 간격비가 감소할수록 말뚝간 응력의 중첩현상이 증가되어 무리말뚝의 지반반력이 단말뚝보다 적게 나타나는 것으로 판단된다.

- (2) 무리말뚝의 p -y곡선을 통해 단말뚝과의 위치에 따른 상호작용계수(p -multiplier)를 산정한 결과 중간열(middle pile)과 후열(rear pile)에 위치한 무리말뚝일수록 앞열(front pile)에 비해 작은 것으로 나타내었다. 이는 무리말뚝의 간격이 좁을수록 중간열과 뒷열의 말뚝들은 앞열 말뚝의 변위와 응력중첩영향으로 인해 상대적으로 지반반력이 감소하는 결과를 나타냈다.
- (3) 무리말뚝 하중분담특성 결과 말뚝간격이 좁을수록 말뚝위치별 하중분담차이가 증가하였는데, 앞열말뚝이 후열말뚝에 비해 평균 1.5배 이상을 분담하는 것으로 나타났다. 그러나 간격비가 증가할수록 하중분담차이가 줄어들어 말뚝 간격이 약 $8D$ 이상에서는 지중응력 중첩효과 영향을 받지 않게 됨으로써 무리말뚝내 모든 말뚝이 단말뚝과 같은 거동을 보이는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 안광국, 김홍택 (2005), 수평력을 받는 군말뚝에서의 말뚝의 상호작용, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 21, No. 2, pp. 47~55.
2. 유동훈, 윤여원 (1998), 사질토 지반에서 수평력을 받는 말뚝의 무리효과, *대한토목학회 논문집*, Vol. 18, No. 2, pp. 439~442.
3. Brown, D. A, Reese, L. C. and O'Neill, M. W. (1987), Cyclic Lateral Loading of a Large-scale Pile Group, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 11, pp. 1326~1343.
4. Matlock, H. and Reese, L. C. (1960), Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 86, No. SM5, pp. 63~91.
5. McVay, M., Casper, R. and Shanq, Te-l. (1995), Lateral Response of Three-row Groups in Loose to Dense Sands at $3D$ and $5D$ Pile Spacing, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 436~441.
6. Prakash, S. and Saran, S. (1967), Behavior of Laterally Loaded Piles in Cohesive Soils, *Proceedings 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Israel, pp. 235~238.
7. Rollins, K. M. and Sparks, A. (2002), Lateral Resistance of Full Scale Pile Cap with Gravel Backfill, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 711~723.

(접수일: 2009. 10. 27 심사일: 2009. 12. 23 심사완료일: 2010. 2. 5)